

Ермолин Евгений Юрьевич

ассистент кафедры геофизических
и геохимических методов поисков
месторождений полезных ископаемых,
кандидат геолого-минералогических наук,
Национальный минерально-сырьевой
университет «Горный»,
199106, Санкт-Петербург,
Васильевский остров, 21 линия, д.2
e-mail: Ermolin_stud@list.ru

Ингеров Александр Исаакович

вице-президент компании «PHOENIX
GEOPHYSICS» LTD, Канада,
Торонто, Онтарио.
кандидат геолого-минералогических наук,
3781 Victoria Park Avenue Unit #3 Toronto,
Ontario, Canada M1W 3K5
e-mail: oingerov@phoenix-geophysics.com.

**ПЯТИКОМПОНЕНТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ
МТЗ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ 2D
АНОМАЛЬНЫХ ТЕЛ, НАХОДЯЩИХСЯ
ВНЕ ПРОФИЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ**

Аннотация:

При региональных исследованиях и разведочных работах методом аудиоманнителлурического зондирования, как правило, измеряется и вертикальная компонента естественного переменного магнитного поля (EM) Земли. Метод магнитовариационного профилирования (МВП) легко реализуется с методом АМТ-МТЗ при совместном измерении горизонтальных (H_x , H_y) и вертикальной (H_z) компонент магнитного поля. Метод МВП даёт информацию об аномальных геоэлектрических объектах, расположенных как под профилем измерений, так и в стороне от линий профилей. Индукционные вектора в методе МВП позволяют определить направление на аномальный объект. Однако определить относительную проводимость двумерного (2D) аномального объекта, глубину залегания верхней кромки (H) и расстояние до него в плане (L) возможно только при комплексировании метода АМТ-МТЗ и МВП. Относительная проводимость сечения (G) 2D аномального объекта может быть определена по частоте максимума кривых амплитуды типпера. Использование двумерного моделирования позволяет построить функцию распределения максимальной амплитуды типпера от расстояния L и глубины залегания H . Полученная функция с использованием анализа кривых АМТ-МТЗ позволяет определить L и H .

Ключевые слова: магнитотеллурика, вертикальная компонента, типпер, боковые 2D- объекты.

Ermolin E.

assistant of geophysical department
of National Mineral Resources University
(University of Mines),
199106, Saint-Petersburg,
21 line of Vasilievsky is., 2,
e-mail: Ermolin_stud@list.ru

Ingerov A.

vice-president of “Phoenix-geophysics LTD”
3781 Victoria Park Avenue Unit #3 Toronto,
Ontario, Canada M1W 3K5
e-mail: oingerov@phoenix-geophysics.com.

**FIVE-COMPONENT MTS MEASUREMENTS
FOR ESTIMATION THE PARAMETERS OF
2D ANOMALOUS BODIES SITUATED
OUTSIDE THE PROFILE OF
MEASUREMENTS**

Abstract:

During regional profile investigations and reconnaissance survey at exploration area with MT and AMT methods usually vertical magnetic component (H_z) of natural electromagnetic (EM) field is measured. The obtained by H_z data permits together with MT and AMT information to have information about MVP method data. Induction vectors, calculated on the base of this data give the possibility to discover the position of prospective anomalous bodies (in apparent resistivity). But the important questions that are waiting for the answer are the parameters of anomalous bodies like depth to center (or to the top), size and total conductivity of the section of the body. The relative conductance of the section (G) can be estimated using the maxima of the anomalous frequency characteristic. Deeping the centre of the anomalous body as well as bigger distance from the observation profile brings the similar results – reducing the amplitude of anomaly but keep fm the same. Some graphical and analytical relation can be proposed to separately estimate G , as well as distance the body epicenter from profile (L) as well as depth to the top of the body (H).

Key words: magneto-tellurics, vertical component, tipper, flank 2D objects.

В последнее десятилетие, благодаря усовершенствованию аппаратной базы, методики полевых работ и технологий обработки данных, возросла роль магнитотеллурических функций отклика (МТЗ) при профильных региональных исследованиях и рекогносцировочных работах. При интерпретации профильных данных, как и в других геофизических методах, возникает проблема учета неоднородностей, расположенных за пределами профиля. В этом случае важным инструментом является анализ данных МВП. Измерения методом МВП легко реализуются одновременно с измерениями МТЗ. Это делается путем добавления одного канала для измерения вертикальной компоненты магнитного поля (H_z). В магнитотеллурическом методе измеряется 4 горизонтальные компоненты: две магнитные H_x , H_y и две электрические E_x , E_y . Благодаря появлению прецизионных треног [1, 2], позволяющих без труда устанавливать три ортогональных индукционных датчика (H_x , H_y , H_z) на любом рельефе в любое время года, методы МТЗ и МВЗ реализуются совместно без существенных затрат. Установка для измерения методами МТЗ и МВЗ показана на рисунке 1, *a*. Магнитные датчики, установленные на прецизионной треноге, показаны на рисунке 1, *b*.

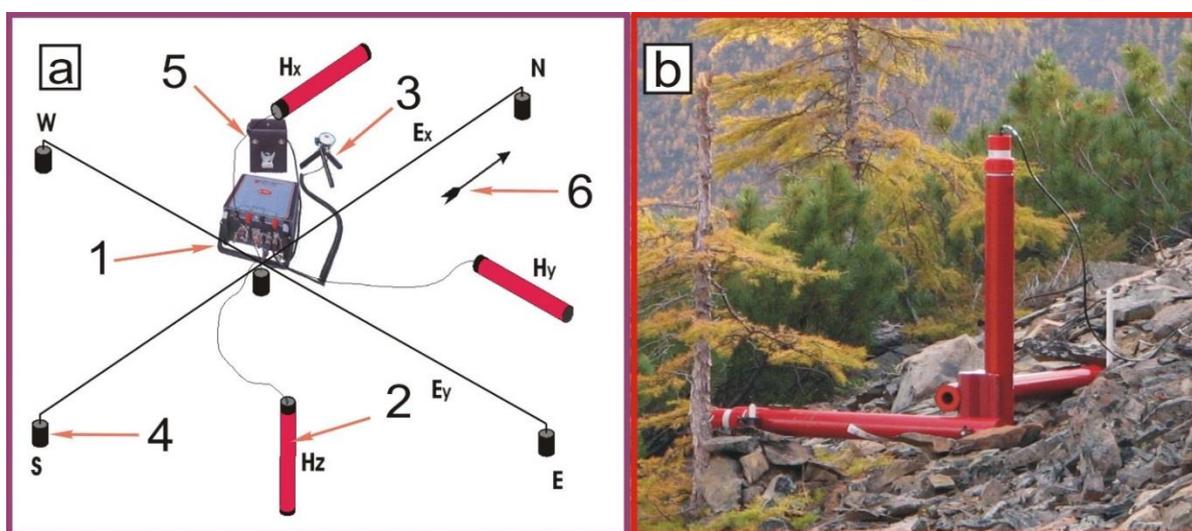


Рис. 1 – Общий вид установки МТЗ-МВП:

a – общий вид установки,

b – вид индукционных датчиков, установленных на прецизионных треногах;

1 – станция MTU-5, 2 – магнитные датчики, 3 – GPS, 4 – неполяризуемые электроды,

6 – азимут расстановки

Значительный вклад в развитие метода МВП внесли W.D. Parkinson [3], H. Wiese [4], Ульрих Шмукер [5], И.И. Рокитянский [6], М.Н. Бердичевский и В.И. Дмитриев [7], К. Возофф [8], Алан Джонс [9] и др. Функциями отклика среды в этом методе являются реальный и мнимый индукционные векторы, а также амплитуда и фаза Типпера. Типпер рассчитывается по трем ортогональным компонентам магнитного поля (1)

$$T = \sqrt{\left(\frac{H_z}{H_x}\right)^2 + \left(\frac{H_z}{H_y}\right)^2} \quad (1)$$

В работе И.И. Рокитянского [10] было показано, что по соотношению компонент индукционного вектора может быть определена суммарная продольная проводимость сечения тела (G), равная площади поперечного сечения, умноженной на удельную электропроводность.

Авторы в нескольких работах исследовали связь характерных точек на вертикальных разрезах типпера, построенных вдоль профилей, пересекающих двумерные проводящие тела различной формы. В работе [11] было показано, что по расстоянию между максимумами на разрезах типпера можно оценить глубину залегания верхней кромки

аномального тела, а по значению периода максимального значения амплитуды типпера можно определить G объекта. В работе [12] показано, что по форме аномалии можно оценить линейные размеры тел пластовой формы, а по соотношению амплитуд максимума типпера можно оценить угол падения пластов. В настоящей работе демонстрируется, что для объектов, находящихся в стороне от точек наблюдения, комплексирование метода МВП и МТЗ позволяет определить глубину верхней кромки (H) и расстояние в плане (L). Исследования проведены с использованием двумерного моделирования, реализованного в программном комплексе WinGLink™.

Методика

В данной работе авторы выполнили оценку параметров 2D-проводника, расположенного в стороне от точек измерения, параллельно профилю МТЗ-МВП (рис. 2). Для данного случая практически все магнитотеллурические параметры (на соответствующих периодах) на профиле измерений будут свидетельствовать о том, что геоэлектрическая среда является двумерной. Магнитотеллурические полярные диаграммы будут иметь соответствующий вид. Диаграммы основных компонент будут иметь форму овала, а диаграммы дополнительных компонент будут иметь четырехлепестковую форму. Несмотря на очевидное доказательство применимости двумерной интерпретации, решение обратной двумерной задачи для указанного на рис. 2 случая будет некорректным. Авторы предлагают методику интерпретации для данного случая, в которой методы АМТ-МАТ и МВП используются совместно.

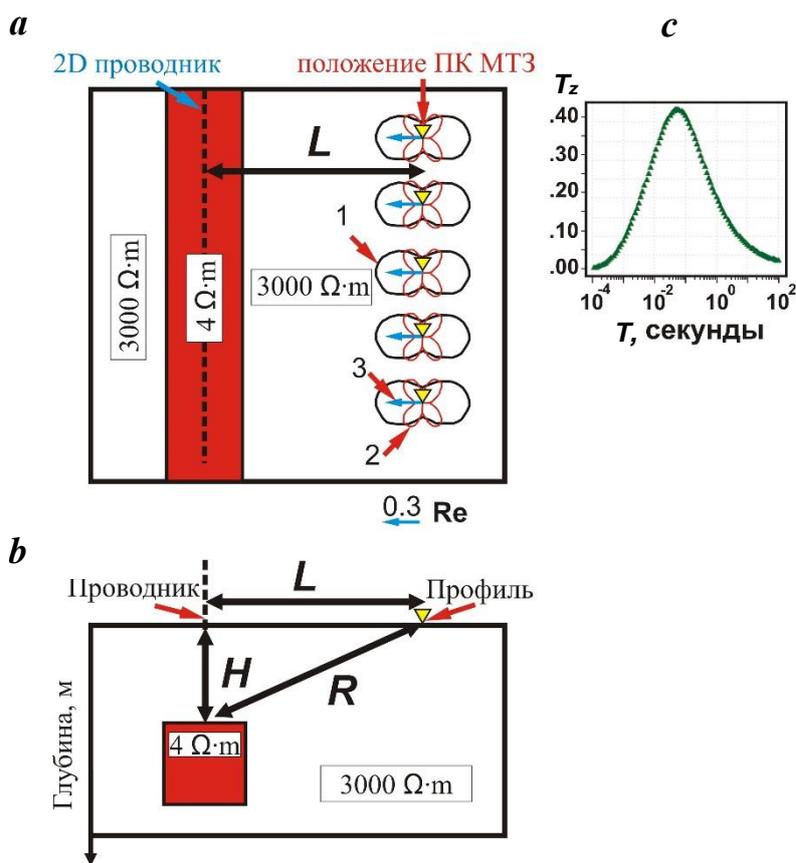


Рис. 2 – (a, b) Геоэлектрическая модель (без масштаба) 2D проводящего тела с сечением 200×200 м

На плане a – амплитудные магнитотеллурические диаграммы основных (1) и дополнительных (2) импедансов, 3 – реальные индукционные векторы (показывают на проводник) для периода 0,06 с;

L – расстояние от профиля до оси проводника в плане,

H – глубина до верхней кромки проводника;

c – амплитуда типпера в точке наблюдения при $L = 1000$ м, $H = 400$ м

В первую очередь следует обращать внимание на поведение индукционных векторов. По ним можно сделать вывод, что аномальный объект находится в стороне от точек наблюдения. Далее следует сделать анализ кривых типпера.

В работе [11] авторами исследовались взаимосвязи между параметрами аномального 2D-объекта и максимумами на разрезах типпера. Было показано, что по частоте максимумов типпера можно определить относительную продольную проводимость сечения тела (G) по формуле (2):

$$G = 2 \cdot 10^5 \cdot T_{\max}, \quad (2)$$

где T_{\max} – значение периода максимума на разрезе типпера.

На рис. 3 показаны разрезы типпера вкост аномального тела с $G = 10000 \text{ Sm}\cdot\text{m}$, расположенного на глубинах 125 м (рис. 3, *a*), 325 м (рис. 3, *b*) и 725 м (рис. 3, *c*). Рисунок демонстрирует, что при фиксированной G и различной глубине залегания верхней кромки проводника значение периода T_{\max} остается постоянным. Кроме того, значение экстремального периода будет одинаково на всех точках профиля. Таким образом, на кривых типпера для каждого пикета будет наблюдаться максимум, и значение периода этого максимума будет одинаковым для всех кривых. Этот факт делает возможным определение значения G аномального двумерного объекта с изометрическим сечением по любой одной точке, расположенной в стороне от исследуемого аномального объекта.

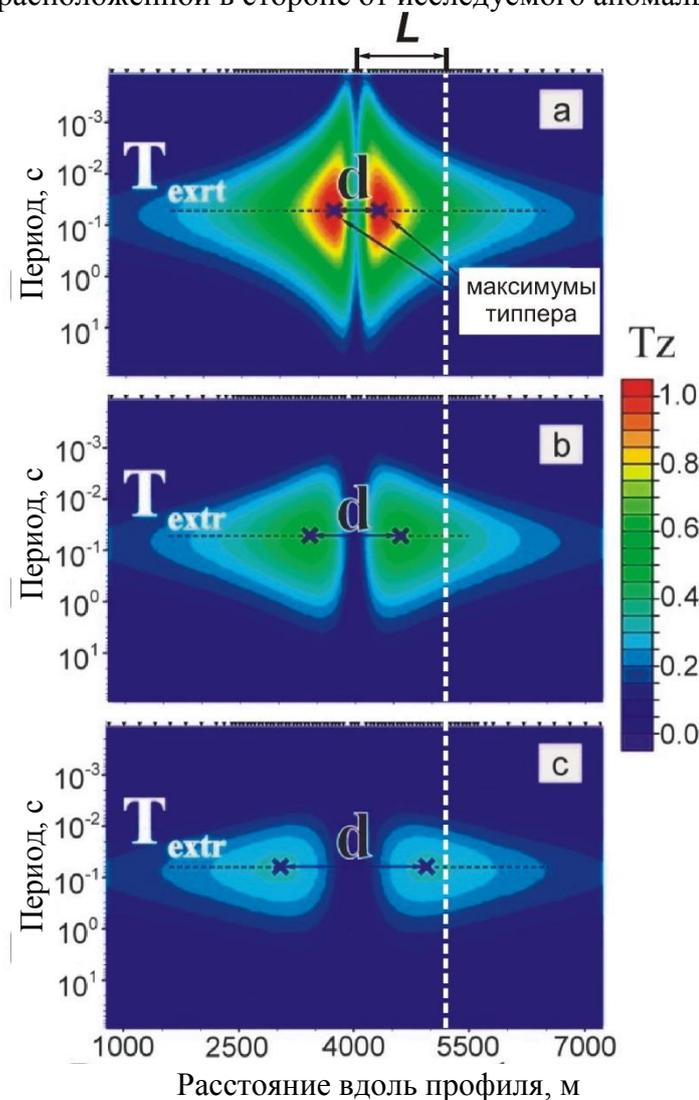


Рис. 3 – Вертикальные разрезы типпера для 2D-проводников одинаковым $G = 10000 \text{ Sm}\cdot\text{m}$ и различной глубиной залегания верхней кромки: *a* – 125 м, *b* – 325 м, *c* – 725 м

Очевидным является тот факт, что амплитуда типпера (A_{\max}) в точке наблюдения на рис. 2 будет зависеть от расстояния L и глубины H до аномального тела. Авторы выполнили анализ функции $A_{\max} = F(L, H)$ с использованием двумерного моделирования (вдоль профиля по линии L на рис. 2) при фиксированном значении G изменялись L и H . После этого с рассчитанных кривых типпера снимались значения A_{\max} . В результате был получен набор данных (таблица), в котором значениям L соответствовали значения H и A_{\max} . Нагляднее всего данную функцию изображать в виде поверхности (рис. 4) с использованием программы Surfer™ 8. Авторами было выполнено моделирование для тел с различными значениями G . В данной работе приведен только аномальный объект с $G=10000 \text{ Sm}\cdot\text{m}$.

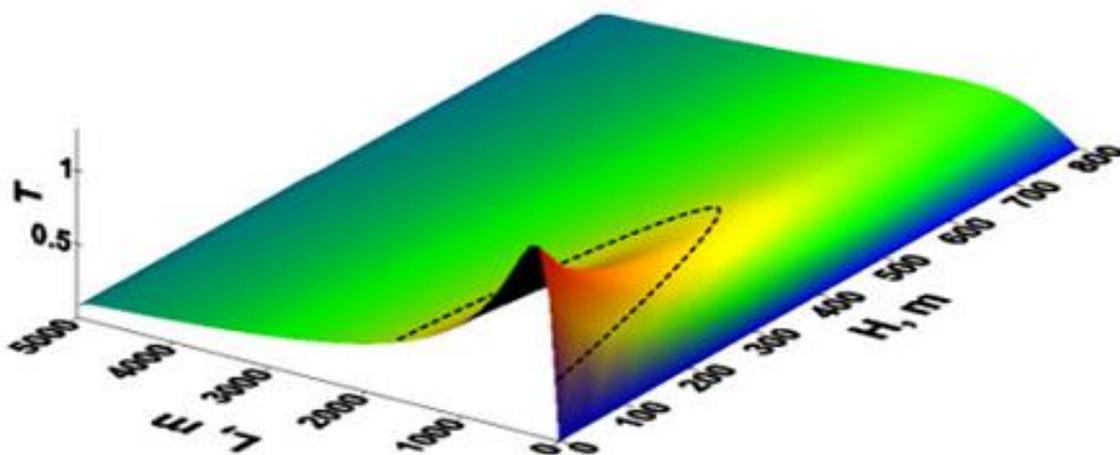


Рис. 4 – Зависимость максимальной амплитуды типпера (A_{\max} – вертикальная ось) от параметров L и H (горизонтальные оси) для фиксированного значения $G = 10000 \text{ Sm}\cdot\text{m}$. Пунктирной линией показан срез для значения типпера = 0,41

Из рассмотрения рис. 4 видно, что определенному значению максимальной амплитуды типпера, в частности значению $A_{\max} = 0,41$ (наблюдается при $L = 1000$ м и $H = 400$ м), соответствует множество эквивалентных моделей. Таким образом, без привлечения дополнительной информации определение L и H невозможно. Эту дополнительную информацию можно взять из анализа кривых МТЗ-АМТ.

Известно, что в случае, если геоэлектрическая среда близка к двумерной и измерение выполнено над аномальным 2D-объектом, то глубину до верхней кромки объекта можно найти при помощи метода асимптот продольных (ТЕ-моде) кривых МТЗ [13, 10]. Если же точка наблюдения находится в стороне от аномального объекта, то по данной методике можно определить минимальное расстояние до проводника (R):

$$R = \sqrt{H^2 + L^2} . \quad (3)$$

Таким образом, используя измерения МТЗ, можно определить R . Если построить графики функции $L = \sqrt{R^2 - H^2}$ для определенного R и график L как функцию от H и A_{\max} (горизонтальный срез на рис. 4) в одной системе координат, то по точке пересечения данных графиков можно определить истинные значения L и H . Графики $L = \sqrt{R^2 - H^2}$ для различных R и горизонтальный срез с рис. 4 для $A_{\max} = 0,41$ показан на рис. 5. Из рис. 5 видно, что график $L = \sqrt{1070^2 - H^2}$ и горизонтальный срез пересекаются в соответствующей точке с координатами $L=1000$ м и $H = 400$ м.

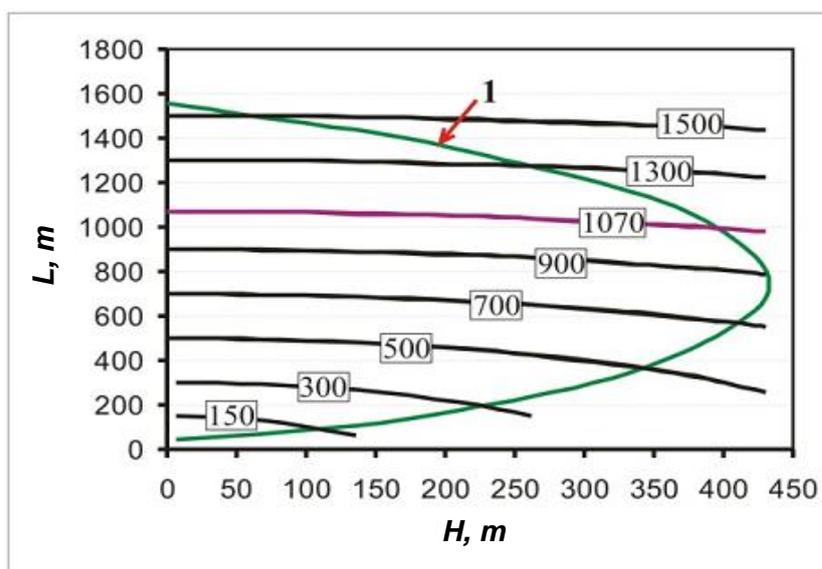


Рис. 5 – Два типа графиков: 1 – срез для значения типпера = 0,41 и 2 – $L = \sqrt{R^2 - H^2}$ (цифрами обозначены значения R). Фиолетовым показана линия $R = \sqrt{(H = 400)^2 + (L = 1000)^2}$

Результаты

Результаты исследования позволяют обосновать пошаговую методику определения параметров аномального 2D-объекта, расположенного в стороне от точки измерения МТЗ-МВП:

1. Выполняется анализ индукционных векторов, определяется, с какой стороны находится аномальный объект;

2. По частоте максимума на полевой кривой типпера определяется относительная проводимость сечения (G) аномального 2D-объекта;

3. Выполняется 2D-моделирование для аномального 2D-объекта с фиксированным значением G и различной глубиной залегания верхней кромки. С модельных кривых типпера на различном расстоянии от оси аномального объекта (L) снимается значение амплитуды максимума типпера. Строится зависимость максимальной амплитуды типпера (A_{\max}) от параметров L и H ;

4. С полученной зависимости снимается срез – функция L от H для A_{\max} , соответствующей амплитуде на полевой кривой типпера.

5. По полевой кривой МТЗ (ТЕ-мод) с использованием метода асимптот определяется расстояние от точки наблюдения до аномального объекта – R ;

6. В одной системе координат $L - H$ строится два графика функций: 1 – срез для A_{\max} и 2 - $L = \sqrt{R^2 - H^2}$. Точка пересечения данных графиков имеет координаты истинных L и H .

Кроме приведенного графического метода определения параметров аномального объекта, авторы рассматривали аналитический метод.

Выводы

Если 2D аномальный геоэлектрический объект, имеющий изометрическое сечение, расположен в стороне от точки наблюдения, то комплексирование методов МТЗ и МВЗ позволяет определить его параметры. Относительная проводимость сечения (G), расстояние в плане (L) и глубина верхней кромки (H) аномального объекта могут быть определены в результате анализа карты реальных индукционных векторов, анализа кривых амплитуды типпера, применения 2D математического моделирования и анализа продольных кривых МТЗ.

Литература

1. Hi sensitivity EM prospecting technique based on measurement of three magnetic components of natural EM field / O. Ingerov et al // 19th IAGA WG Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, Beijing. - 2008. - P. 965 - 970
2. Non-grounded Surface Electroprospecting Technique / O. Ingerov et al // 70th EAGE annual Conference. - Amsterdam #6149. - 2009.
3. Direction of rapid electromagnetic fluctuation / W.D. Parkinson // Geophys. - 1959. - J. 2. - P. 1 – 14.
4. Wiese H. Geomagnetic Tiefentellurik / H. Wiese. - Deutche Akad Wiss. Berlin, 1965.
5. Schmucker U. Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States / U. Schmucker // Scripps. Inst. of Oceanogr., La Jolla, Calif. - 1970. - Bull. 13. – P.1 – 165.
6. Rokityansky I.I. Geoelectromagnetic Investigation of the Earth's Crust and mantle / I.I. Rokityansky. - Berlin: Springer-Verlag - New York: Heidelberg, 1982. - 378 p.
7. Berdichevsky M.N. Models and methods of Magnetotellurics / M.N. Berdichevsky, V.I. Dmitriev. - Berlin: Springer-Verlag, Heidelberg, 2008. - 563 p.
8. Vozoff K. The magnetotelluric method / K. Vozoff // Electromagnetic methods in applied geophysics. Vol. 2. Applications. Series: Investigations in geophysics, 3. – 1991. - P. 641 – 711.
9. Jones A.G. Comment on "Geomagnetic Depth Sounding by Induction Arrow. Representation: A Review" by G.P. Gregori and L.J. Lanzerotti / A.G. Jones // Reviews of Geophysics and Space Physics. – 1981. – № 19. - P. 687 - 688.
10. Rokityansky I.I. Investigation of electrical conductivity anomalies by the method of magnetovariation profiling / I.I. Rokityansky. - Kiev: Naukova Dumka, 1975. - 279 p.
11. Ingerov O. The parameter estimation of 2D conductive isometric bodies by singular points at the tipper frequency characteristic / O. Ingerov, E. Ermolin // Proceedings of 20th Induction Workshop IAGA, Giza, Egypt-2010. - September 18 - 24. – P. 303 - 306.